

인터리브드 PWM 컨버터에서의 Coupled Inductor 해석

신동설*, 차헌녕**, 이종필***, 유동욱***, 김희제*
 부산대학교 전자전기공학부*, 경북대학교 에너지공학부**, 한국전기연구원***

Analysis of Coupled Inductor for Interleaved PWM converter

Dongsul Shin*, Honnyong Cha**, Jong Pil Lee***, Dong Wook Yoo***, Heeje Kim*
 Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University*
 School of Energy Engineering, Kyungpook National University**
 Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)***

ABSTRACT

The interleaving method is usually used to reduce the ripple of output current of filter inductor in parallel operation of PWM DC/DC converter. Although the current ripple of filter inductor decreases, each current ripple of filter inductor is not decreased. In this study, the operation of interleaved buck converter with coupled inductor is analyzed in each operation mode. It is verified through experiment. The possibility of application to grid connected inverter with parallel operation is identified.

1. 서 론

최근, 태양광 발전과 풍력 발전 시스템에서 대용량의 전력 변환 장치가 요구되고 있다. 현재 전력 변환 장치 대용량은 병렬운전을 통해서 구현의 어려움을 해결하고 있고, 병렬운전에 인터리빙 (Interleaving) 기법을 적용하여 필터 인덕터의 출력 전류 리플을 감소시킬 수 있다. 하지만, 각 상의 필터 인덕터의 전류 리플은 감소하지 않는다. 인터리빙 기법과 함께 출력 필터 인덕터를 커플링 함으로써 각 상의 필터 인덕터의 전류 리플도 감소시키는 것이 가능하다.

본 연구에서는 커플링된 필터 인덕터를 가지는 PWM DC/DC 컨버터의 해석을 통해서 인터리빙기법과 출력 인덕터의 커플링 효과에 대해 확인하고 실험을 통해서 이를 검증하였다. 그리고 이후 계통연계 인버터에 적용 가능성을 확인하였다.

2. Coupled Inductor가 적용된 단상 인터리브드 벡 컨버터의 병렬운전 해석

인터리빙 기법이 적용된 단상 벡 컨버터의 병렬운전해석을 위해서 coupled inductor를 트랜스포머 π model로 변환하여 해석하였다. PWM 인버터로의 확장이 가능하며 이후 실험을 통해서 검증한다.

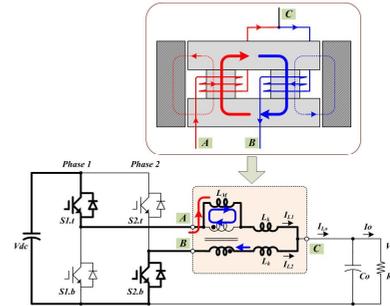


그림 1. Mode 1

2.1 Mode 1 (S1.t & S2.b on, S1.b & S2.t off)

그림 1를 보면 coupled inductor의 A점으로는 전류 (I_{L1})가 들어가고 B점으로부터는 전류 (I_{L2})가 나온다. 따라서 coupled inductor에 강한 flux가 형성하며 이때의 등가인덕턴스 (L_{eq1})는 식 (1)과 같다.

$$L_{eq1} = \frac{L_k^2 - M^2}{L_k - \frac{D'}{D}M} = \left(\frac{1 - k^2}{1 - \frac{D'}{D}k} \right) L_k \dots (1)$$

여기서, L_k : Leakage Inductance, M : Mutual Inductance, k : Coupling Coefficient D : Duty Cycle, D' : $1 - D$

2.2 Mode 2 (S1.b & S2.b on, S1.t & S2.t off)

그림 2에서는 coupled inductor의 A점과 B점에서 전류(I_{L1} , I_{L2})가 빠져 나온다. 서로 상쇄되는 flux가 발생하여 각 상의 누설인덕턴스 (L_k)만 보이며 등가인덕턴스 (L_{eq2})는 식 (2)와 같다.

$$L_{eq2} = L_k - M = (1 - k)L_k = L_k \dots (2)$$

2.3 Mode 3 (S1.b & S2.t on, S1.t & S2.b off)

그림 6에서는 모드 1과는 반대의 경우이며, 이때의 등가인덕턴스 (L_{eq3})는 식 (3)과 같다.

$$L_{eq3} = \frac{L_k^2 - M^2}{L_k - \frac{D}{D'}M} = \left(\frac{1 - k^2}{1 - \frac{D}{D'}k} \right) L_k \dots (3)$$

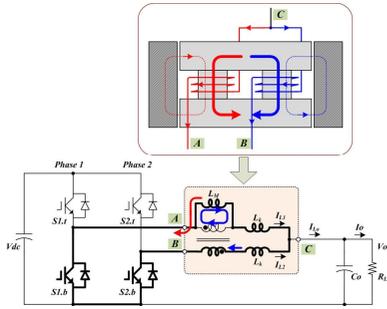


그림 2. Mode 2

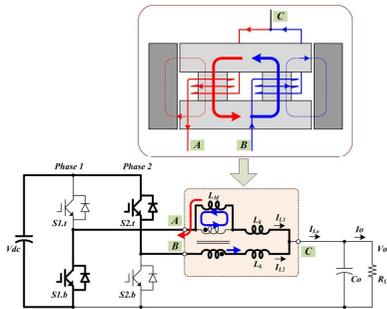


그림 3. Mode 3

2.4 Mode 3 (S1.b & S2.b on, S1.t & S2.t off)

모드 2와 같이 coupled inductor에는 서로 상쇄되는 flux가 발생하여 누설인덕턴스 (L_k)만 보인다.

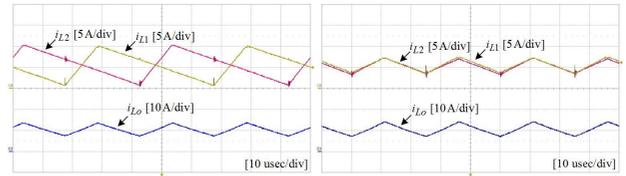
$$L_{eq4} = L_k - M = (1 - k)L_k = L_k \dots \dots \dots (4)$$

3. 실험결과

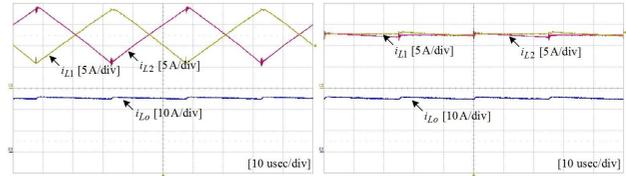
Coupled inductor 프로토타입 제작 ($L_k = 249\mu\text{H}$, $k=0.917$) 하고 커플링 되지 않은 인덕터와의 비교를 위해서 coupled inductor의 누설 인덕턴스와 비슷한 값을 가지는 인덕터 ($267\mu\text{H}$)를 사용하여 비교실험 하였다. 그림 4 6는 인터리브드 벅 컨버터의 비교 실험 결과 파형이다. 각 상의 필터 인덕터 전류에서의 확연한 차이를 확인할 수 있다. Coupled inductor ($L_k=1.81\text{mH}$, $k=0.6$)와 인덕터($L=1.8\text{mH}$)을 사용하여 인터리브드 단상 하프브릿지 인버터에 적용하여 실험을 하였다. 그림 7는 실험결과이며 각 상의 필터 인덕터의 전류 리플 감소 효과와 더불어, 전류 불평형을 억제하는 효과도 확인할 수 있다. 계통연계 인버터의 병렬 운전시 인터리빙 기법과 함께 필터 인덕터를 커플링 시킴으로써 보다 효율적으로 대용량 계통연계 인버터의 운전이 가능할 것이다.

4. 결론

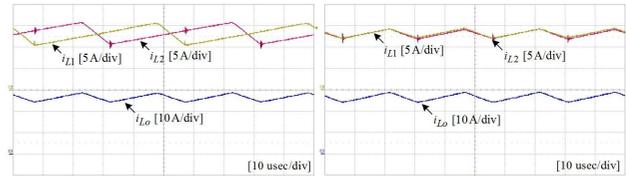
본 논문에서는 coupled inductor를 적용한 인터리브드 PWM DC/DC 컨버터의 병렬운전을 해석하고 인터리브드 벅 컨버터에 필터 인덕터에 커플링한 것과 하지 않은 것을 비교 실험하여 필터 인덕터의 전류 리플 감소를 확인하였다. 이를



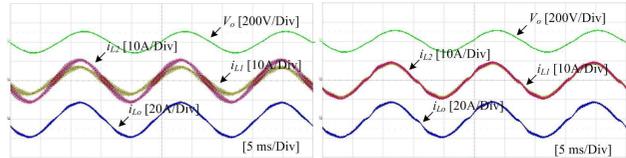
(a) Non coupled Inductor (b) Coupled Inductor
그림 4. 인터리브드 벅 컨버터의 비교 실험 (D=0.2)



(a) Non coupled Inductor (b) Coupled Inductor
그림 5. 인터리브드 벅 컨버터의 비교 실험 (D=0.5)



(a) Non coupled Inductor (b) Coupled Inductor
그림 6. 인터리브드 벅 컨버터의 비교 실험 (D=0.8)



(a) Non coupled Inductor (b) coupled inductor
그림 7. 인터리브드 하프 브릿지 인버터 비교 실험

더 확장 하여 하프브릿지 단상 인버터에도 적용하였다. 실험 결과를 통해 필터 인덕터의 전류 리플 감소와 함께 전류 불평형 억제 효과도 확인할 수 있었다. 이를 통해 계통연계 인버터로의 적용 가능성을 확인 하였다.

참고 문헌

[1] Pit Leong Wong, Peng Xu, Yang, P., Lee, F.C., "Performance improvements of interleaving VRMs with coupling inductors", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 16, No. 4, pp. 499 507, July, 2001
[2] Jieli Li, Sullivan C.R., Schultz A., "Coupled inductor design optimization for fast response low voltage DC DC converters" Applied Power Electronics Conference and Exposition 2002, Vol. 2, pp. 817 823